

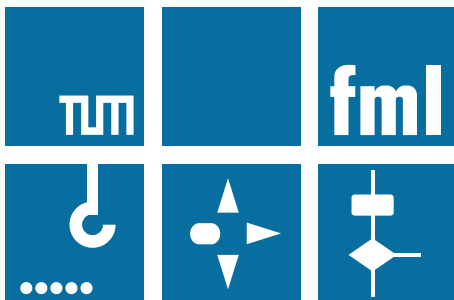
III.

15. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2010

Aktuelle Fragestellungen und Lösungen

Ermittlung von Dimensionierungs- und Auslegungsvorschriften für stark geneigte Schneckenförderer

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. W.A. Günthner
Dipl.-Ing. S. Rakitsch



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. W.A. Günthner

fml - Lehrstuhl für
Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstraße 15

85748 Garching

Ermittlung von Dimensionierungs- und Auslegungsvorschriften für stark geneigte Schneckenförderer

Die gestiegenen Anforderungen an stetige Fördermittel für Schüttgüter finden auch beim Einsatz von Schneckenförderern Berücksichtigung. Um diesem Aspekt gerecht zu werden, läuft am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) derzeit ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördertes Projekt, im Rahmen dessen die Schüttgutförderung in geneigten Schneckenförderern untersucht wird. Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines einfach anwendbaren und sicheren Dimensionierungs- und Auslegungsverfahrens für stark geneigte Schneckenförderer für Schüttgut unter Berücksichtigung von Konstruktions-, Betriebs- und Schüttgutparametern.

1 Einleitung

Die Vorteile, wie der einfache und robuste Aufbau, die niedrigen Anlagen- und Wartungskosten, die geringe Störanfälligkeit und im Besonderen die staubdichte Ausführung, führen häufig zum Einsatz von Schneckenförderern für den stetigen Schüttguttransport. Konventionelle Schneckenförderer sind für den Transport staubförmiger, körniger und leicht feuchter Schüttgüter geeignet. Der Einsatz von Schneckenförderern beim Massengutumschlag ist in Bild 1 dargestellt. Die Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit, Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit aber auch bezüglich der Energieeffizienz und des Umweltschutzes für Schneckenförderer sind in den letzten Jahren deutlich gestiegen.



Bild 1: Massengutumschlag mit Hilfe von Schneckenförderern

Schneckenförderer müssen deshalb, wie andere Stetigförderer für Schüttgut auch, zuverlässig ausgelegt werden, um Ausfallzeiten oder Überdimensionierung zu vermeiden. Nachdem in den letzten Jahren durch Forschungsarbeiten am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik bereits solche Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren für horizontal bis leicht geneigte bzw. vertikale Schneckenförderer erarbeitet wurden, wird durch dieses Projekt nun die fehlende Lücke bei den stark geneigten Förderern geschlossen.

Schneckenförderer bestehen im Wesentlichen aus einem Fördertrog oder -rohr und der Förderschnecke, bestehend aus Schneckenwelle und -wendel. Bei der horizontalen und leicht geneigten Förderung kann die Gutbewegung unter bestimmten Voraussetzungen als rein translatorisch betrachtet werden. Beim Übergang in den stärker geneigten Bereich wird diese translatorische Gutbewegung von einem rotatorischen Anteil überlagert bis beim Extremfall der vertikalen Förderung nur noch die rotatorische Gutbewegung vorherrscht. Entscheidenden Einfluss auf die Art der Förderung haben nach *Vollmann* [1] die Neigung β und die Schneckendrehzahl n des Schneckenförderers. Wie in Bild 2 dargestellt, erfolgt die rein translatorische Förderung (Bereich I) abhängig von der Schneckendrehzahl bis zu einem gewissen Grenzwinkel. Bei größeren Neigungswinkeln und Schneckendrehzahlen, aber unterhalb einer gewissen Grenzdrehzahl, liegt der Bereich II, in dem sich die translatorische und die rotatorische Förderung überlagern. Wird nun die Schneckendrehzahl erhöht, bewegt sich das Gut ausschließlich rotatorisch (Bereich III). Ein translatorischer Anteil ist ab einem zweiten Grenzneigungswinkel aufgrund des Schwerkrafteinflusses nicht mehr möglich. Im Bereich III und teilweise im Bereich II ist eine Förderung nur möglich, wenn die Schneckenwendel eine gewisse Mindestdrehzahl aufweist. Diese Mindestdrehzahl ist nötig, damit das Schüttgut durch die Zentripetalkraft am Förderrohr gehalten wird und nicht nach unten abgleitet.

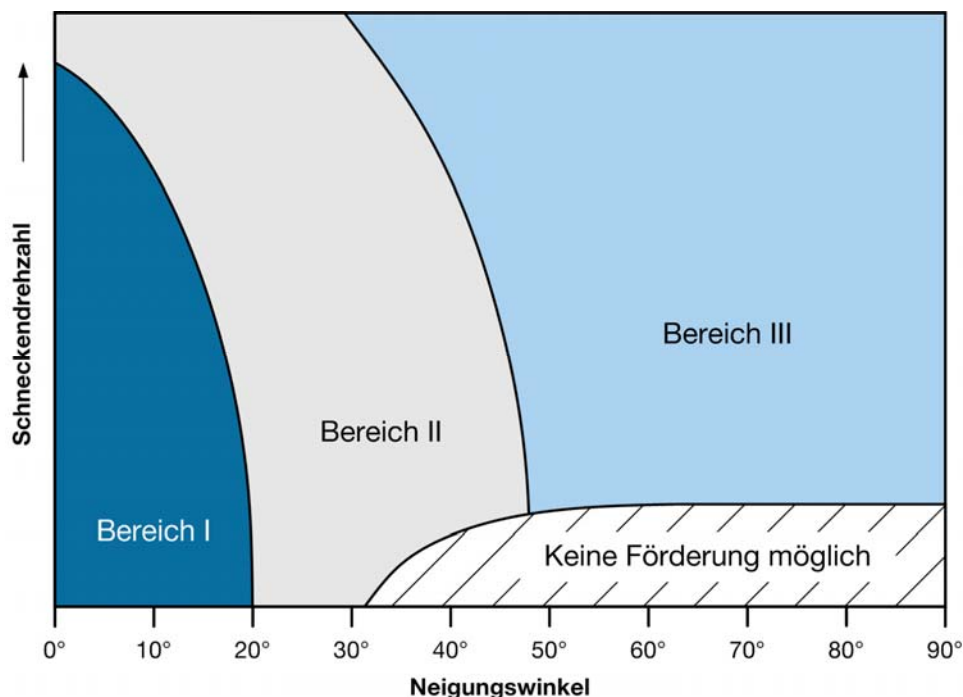


Bild 2: Arten der Förderung im Schneckenförderer nach Schneckendrehzahl und Neigung [1]

2 Stand der Forschung

Wie oben beschrieben wurden am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik in den letzten Jahren bereits zahlreiche Arbeiten durchgeführt, die sich der Beschreibung von Schneckenförderern und der Entwicklung von Dimensionierungs- und Auslegungsvorschriften widmeten. Gerade die letzten Arbeiten ([2], [3]) hatten die Schaffung von praxistauglichen Verfahren, die für den Anwender leicht zu beherrschen sind, zum Ziel und wurden von *Blomeyer* [4] verifiziert. Für die horizontalen bis leicht geneigten Schneckenförderer entstand so ein Verfahren, welches stark an die *DIN 15262* [5] angelehnt ist. So berechnet sich in beiden Verfahren der geförderte Volumenstrom gemäß dem aus der Kontinuumsmechanik bekannten Ansatz, dass der Volumenstrom gleich dem Produkt aus durchflossener Fläche und Geschwindigkeitskomponente in Flussrichtung ist, gemäß

$$I_V = A \cdot v_{ax} = \varphi \cdot \frac{1}{4} \cdot D^2 \cdot \pi \cdot S \cdot n \quad (1)$$

aus dem Füllungsgrad φ , dem Schneckendurchmesser D , der Schneckenganghöhe S und der Schneckendrehzahl n . Dem Ansatz liegt zu Grunde, dass durch den einschränkenden Gültigkeitsbereich eine rein translatorische Bewegung des Schüttguts vorliegt. Bei der Berechnung der erforderlichen Antriebsleistung P wird auch in beiden Verfahren auf den gleichen Ansatz zurückgegriffen: Neben der analytisch leicht bestimmbar Hubleistung werden alle Reibanteile zusammengefasst und ähnlich der Coulombschen Reibung in der klassischen Mechanik mittels eines fiktiven Gesamtreibwerts, dem Verschiebewiderstandsbeiwert λ_h , aus einer bekannten Bezugsgröße, hier dem Volumenstrom I_V , berechnet. Die Antriebsleistung ergibt sich damit zu

$$P = \rho \cdot I_V \cdot g \cdot (\lambda_h \cdot L + H) \quad (2)$$

aus der Schüttdichte ρ , dem Volumenstrom I_V , dem Verschiebewiderstandsbeiwert λ_h sowie den Geometrieparametern Förderlänge L und Förderhöhe H . Entscheidender Unterschied des neuen Verfahrens ist die Definition des Verschiebewiderstandsbeiwerts λ_h als mehrdimensionale Kenngröße. Während die *DIN 15262* den Verschiebewiderstandsbeiwert als konstanten, schüttgutspezifischen Wert kennt, wird im neuen Verfahren den experimentell gewonnenen Erkenntnissen Rechnung getragen, dass der Verschiebewiderstandsbeiwert von Geometrie-, Betriebs- und Schüttgutparametern abhängt. Die Berechnung kann der Arbeit von *Blomeyer* [4] entnommen werden.

In den genannten Arbeiten wurde ebenfalls ein Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren für vertikal betriebene Schneckenförderer entwickelt. Diese Verfahren wurden als teilweise grafische Verfahren realisiert. Da beim vertikalen Förderer, wie oben beschrieben, ein rein rotatorisches Förderverhalten vorliegt, wird das Schüttgut im Förderer auf einer Schraublinie aufwärts gefördert. Die Gutgeschwindigkeit wird daher um einen rotatorischen Anteil, der Gutwinkelgeschwindigkeit ω_G , verringert. Der erzielbare Volumenstrom I_V berechnet sich daher zu

$$I_V = A \cdot v_{ax} = \varphi \cdot \frac{1}{4} \cdot D^2 \cdot \pi \cdot S \cdot \left(n - \frac{\omega_G}{2\pi} \right) \quad (3)$$

Die Gutwinkelgeschwindigkeit ω_G kann durch Lösung der Bewegungsgleichungen berechnet werden. Da dies aber für jeden Einzelfall separat geschehen müsste, wird die Bestimmung des Volumenstroms als grafisches Verfahren angeboten. Als Beispiel ist in Bild 3 ein entsprechendes Diagramm für Füllungsgrade von $\varphi = 0,4$ gezeigt.

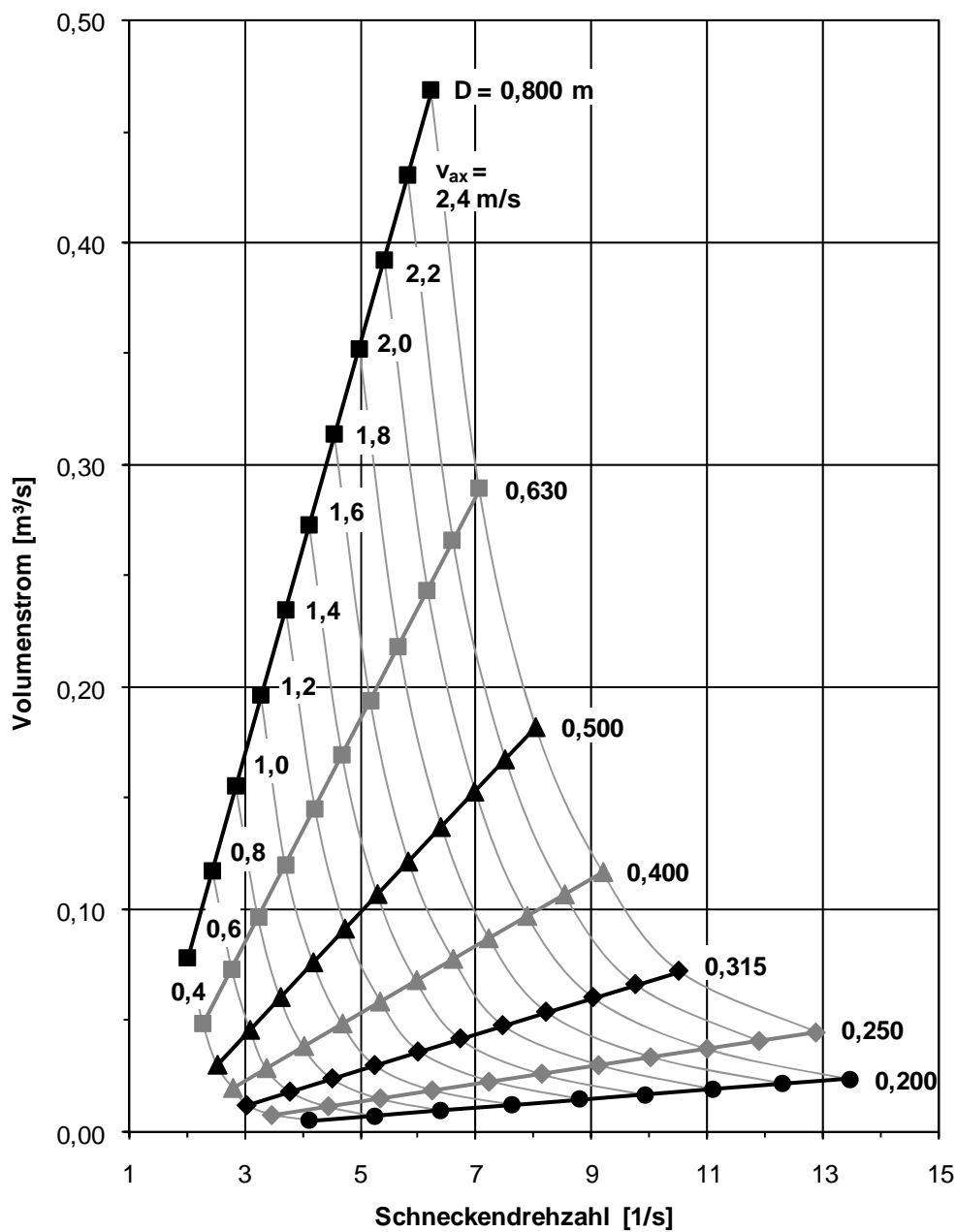


Bild 3: Diagramm zur Bestimmung des Volumenstroms beim vertikalen Schneckenförderer [3] für einen Füllungsgrad von 0,4

Die Berechnung der notwendigen Antriebsleistung erfolgt nach einem ähnlichen Vorgehen wie im Bereich I. Wieder wird eine Gesamtreibleistung berechnet, die sich als Produkt aus einem Förderfaktor und den analytisch ermittelbaren Reibleistungen gegen Förderrohr und Schneckenwendel errechnet. Die Verlustleistung durch das Anheben des Schüttguts wird wieder addiert. Der Förderfaktor ist, analog zum Verschiebewiderstandsbeiwert, eine von Geometrie-, Betriebs- und Schüttgutparametern abhängige Kenngröße. Die genauen Berechnungsformeln sowie weitere Diagramme zur Volumenstrombestimmung können der Arbeit von *Rong* [6] entnommen werden.

In früheren Jahren wurden am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik ebenfalls bereits Untersuchungen an stark geneigten Schneckenförderern durchgeführt. Aufbauend auf die Arbeit von *Gabler* [7] wurden dazu von *Vollmann* [1] immer feinere Berechnungsalgorithmen und Programme entwickelt, mit denen es möglich ist den Volumenstrom und die Antriebsleistung von stark geneigten Schneckenförderern zu berechnen. Grundlage ist die analytische Betrachtung der Spannungsverhältnisse im Inneren des Schüttguts und an den Berührungspunkten mit dem Schneckenförderer. Das Schüttgut im Schneckenförderer wird dazu in Segmente unterteilt, für die einzeln die Bewegungsgleichungen gelöst werden. Durch dieses Verfahren kann das Schüttgut mit seinen inneren Gleitvorgängen, aber auch den Einflüssen durch die Reibung am Rohr sehr exakt abgebildet werden. Aus der Aufsummierung der einzelnen Geschwindigkeiten und Reibkräfte kann schließlich der Volumenstrom berechnet werden. Für die Antriebsleistung kann eine Näherungslösung bestimmt werden. Obwohl diese Betrachtungen die Förderung in geneigten Schneckenförderern gut beschreiben, genügen sie nicht dem Ansatz eines einfachen und praxistauglichen Berechnungsverfahrens. Der Grund liegt in der nötigen Komplexität des analytischen Modells, das nicht durch einen geschlossenen lösbaren Gleichungssatz beschrieben werden kann. Zur Lösung eines jeden spezifischen Problems sind daher numerische Verfahren nötig, die nur mit Rechnerunterstützung bewältigt werden können. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass nur der Förderbereich III analytisch beschrieben werden kann und das Verfahren daher nur für diesen Bereich gültig ist. Dennoch liefert das Verfahren wertvolle Aussagen zum Förderverhalten und den Einflüssen der verschiedenen Parameter und bildet daher eine wichtige Grundlage für die vorliegende Untersuchung.

3 Vorgehensweise und Zielsetzung

Um das Ziel des Projekts, die Entwicklung eines einfach anwendbaren und sicheren Dimensionierungs- und Auslegungsverfahrens für stark geneigte Schneckenförderer für Schüttgut unter Berücksichtigung von Konstruktions-, Betriebs- und Schüttgutparametern, zu erreichen, werden die folgenden Teilschritte bearbeitet:

- Durch Versuche, Simulationen und der Auswertung der analytischen Berechnungsmethoden früherer Arbeiten werden Daten für stark geneigte Schneckenförderer gewonnen. Hauptaugenmerk liegt dabei auf Förderern, die mit hohen Schneckendrehzahlen und hohen Füllungsgraden betrieben werden. Als zu untersuchende Einflussparameter werden die Schneckendrehzahl, der Neigungswinkel, der Füllungsgrad, die Förderergeometrie sowie das verwendete Schüttgut betrach-

tet. Als Zielgrößen werden ein Geschwindigkeits- und ein Leistungsbeiwert ermittelt. Diese Beiwerte entsprechen in ihrem Wesen dem Verschiebewiderstandsbeiwert bzw. dem Förderfaktor bei den horizontal bis leicht geneigten bzw. vertikalen Schneckenförderern und erfassen den Einfluss der untersuchten Parameter.

- Im zweiten Schritt wird der Einfluss der variierten Geometrie-, Betriebs- und Schüttgutparameter analysiert. Die hier gefundenen Zusammenhänge bilden die Grundlage für die Entwicklung des Dimensionierungs- und Auslegungsverfahrens im folgenden Schritt.
- Im letzten Schritt schließlich werden aus den gewonnenen Daten der Beiwerte und den abgeleiteten Abhängigkeiten mittels statistischer Regressionsanalysen Formeln entwickelt, mit denen der Geschwindigkeits- und der Leistungsbeiwert einfach und sicher berechnet werden kann. Die gefundenen Formeln werden abschließend auf ihre Güte hin bewertet.

4 Modelle zur Volumenstrom- und Leistungsberechnung

Die zu entwickelnden Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren sollen sich an den aus der *DIN 15262* bekannten Berechnungsvorschriften orientieren. Es wird deshalb im Folgenden dargelegt, wie die Formeln aufgebaut sind und wie die oben genannten Beiwerte integriert sind.

4.1 Berechnung des erzielbaren Volumenstroms

Die Berechnung des Volumenstroms erfolgt wiederum als Produkt aus der axialen Geschwindigkeit v_{ax} und der durchflossenen Querschnittsfläche A . Diese wird als Kreisring durch den Schneckendurchmesser D und dem Wellendurchmesser d beschrieben. Da der Schneckenförderer nicht komplett gefüllt ist, reduziert sich diese Fläche um den Füllungsgrad φ und berechnet sich nach

$$A = \varphi \cdot \frac{1}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot \pi \quad (4)$$

Bei der stark geneigten Förderung überlagern sich die translatorische und rotatorische Gutbewegung und eine analytische Beschreibung ist nicht mehr möglich. Durch das Auftreten einer rotatorischen Komponente kann aber davon ausgegangen werden, dass die axiale Geschwindigkeit auf alle Fälle kleiner ist als der Vorschub bei einer horizontalen Förderung mit ansonsten gleichen Parametern. Dies wurde von *Vollmann* [1] nachgewiesen. Die Gutaxialgeschwindigkeit v_{ax} beim geneigten Schneckenförderer kann also als Anteil der axialen Geschwindigkeit beim horizontalen Förderer gesehen werden:

$$v_{ax} = S \cdot n \cdot \zeta \quad (5)$$

Dabei ist ζ der Geschwindigkeitsbeiwert, der wie oben beschrieben, im Intervall $0 \leq \zeta \leq 1$ liegt. Die gesetzten Grenzen des Beiwerts sind anschaulich zu erklären: Einerseits findet für $\zeta = 0$ keine Förderung statt. Dieser Fall kann, wie in Bild 2 dargestellt, auch für Schneckendrehzahlen größer $n = 0$ 1/s auftreten, wenn die Mindestdrehzahl, die zur Förderung nötig ist, unterschritten wird. Andererseits wird für $\zeta = 1$ die maximale Gutaxialgeschwindigkeit der horizontalen Förderung erreicht.

Damit lässt sich der erzielbare Volumenstrom I_V im geneigten Schneckenförderer mit den letzten beiden Gleichungen zu

$$I_V = A \cdot v_{ax} = \varphi \cdot \frac{1}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot \pi \cdot S \cdot n \cdot \zeta \quad (6)$$

zusammenfassen. Der Geschwindigkeitsbeiwert ζ ist dabei die letzte unbekannte Größe und wird als Ergebnis der empirischen Untersuchungen in Abhängigkeit der beschriebenen Einflussparameter bestimmt.

4.2 Leistungsberechnung

Die erforderliche Antriebsleistung resultiert auch beim geneigten Schneckenförderer aus einer Reihe verschiedener Verlustanteile. Neben der Hubleistung zur Überwindung der Höhendifferenz treten vor allem noch Reibleistungen zwischen dem Fördergut und der Geometrie sowie Verlustleistungen im Inneren des Schüttguts auf. Davon kann einzig die Hubleistung P_{Hub} auf einfache Weise analytisch bestimmt werden. Sie berechnet sich dem zu fördernden Volumenstrom I_V , der Schüttdichte ρ und der Förderhöhe H gemäß der Formel

$$P_{Hub} = I_V \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (7)$$

Für die weiteren Verlustleistungen durch Reibung sind unter anderem zu nennen [1]:

- Reibleistung zwischen Gut und Rohrwand
- Reibleistung zwischen Gut und Schneckenwendel
- Reibleistung zwischen Gut und Schneckenwelle
- Verlustleistung in den Zwischenlagern
- Spaltverluste
- Dissipierte Leistung in den Scherfugen
- Verlustleistung aus Gutbeschleunigung

Diese Verlustanteile können nicht auf eine einfach handhabbare Art und Weise berechnet werden, obwohl teilweise analytische Ansätze zur Beschreibung vorliegen [1], [6], [7], [8]. Für sie wird gemäß dem semi-empirischen Ansatz nach *Fottner* [9] eine fiktive Gesamt-reibleistung P_{Reib} angesetzt, welche alle Reibanteile unter Zuhilfenahme von empirisch

ermittelten Kennwerten ausdrückt. Auch beim Ansatz für die Reibleistung wird auf das prinzipielle Vorgehen der *DIN 15262* [5], welches auch schon von *Gabler* [7] und *Vollmann* [1] benutzt wurde, zurückgegriffen und die Reibleistung, ähnlich dem Prinzip der Coulombschen Reibung, als Produkt eines fiktiven Förderfaktors mit der Normalkraft F_N auf das Förderrohr und der absoluten Gutgeschwindigkeit v_G berechnet. Die Normalkraft auf das Förderrohr ist nach *Rong* [6] proportional zum geförderten Volumenstrom I_V . Die Beschleunigung a der Masse hängt von der Art der Förderung – translatorische und rotatorische Anteile – ab und wird zunächst nicht weiter betrachtet. Mit der Schüttdichte ρ , der Förderlänge L und der Gutaxialgeschwindigkeit v_{ax} ergibt sich die Normalkraft F_N zu

$$F_N = \frac{I_V \cdot \rho}{v_{ax}} \cdot L \cdot a \quad (8)$$

Die absolute Gutgeschwindigkeit kann nach *Vollmann* [1] und unter Einbeziehung des Geschwindigkeitsbeiwerts ζ mit dem Schneckendurchmesser D , der Schneckendrehzahl n und der Schneckenganghöhe S dargestellt werden:

$$v_G = D \cdot \pi \cdot n \cdot (1 - \zeta) \cdot \cos^{-1} \left[\arctan \left(\frac{\zeta}{1 - \zeta} \cdot \frac{S}{D \cdot \pi} \right) \right] \quad (9)$$

Um auch bei der Bestimmung der Verlustleistung durch Reibung den Ansatz eines einfachen und praxistauglichen Auslegungsverfahrens gerecht zu werden, werden die vom Geschwindigkeitsbeiwert ζ abhängigen Anteile sowie der unbekannte fiktive Förderfaktor zum Leistungsbeiwert λ zusammengefasst. Ebenfalls enthalten ist die Beschleunigung a der Masse im Schneckenförderer als Anteil der Fallbeschleunigung g . Dies ist nötig, da nicht bekannt ist, in welcher Art die Förderung genau ist. Dies ist aber wiederum von entscheidender Bedeutung für die Art der Beschleunigung, die auf das Schüttgut wirkt. Liegt eine translatorische Förderung vor, wirkt auf das Schüttgut nur die Fallbeschleunigung. Kommt ein rotatorischer Anteil dazu, wirkt auf das Schüttgut zusätzlich eine Zentripetalbeschleunigung, die beim vertikalen Schneckenförderer ausschließlich vorliegt. Damit ergibt sich für die fiktive Gesamtreibleistung folgender Zusammenhang:

$$P_{Reib} = \lambda \cdot \frac{D}{S} \cdot I_V \cdot \rho \cdot g \cdot L \quad (10)$$

Die Bestandteile der zur Förderung nötigen Leistung eines geneigten Schneckenförderers sind somit bekannt und können folgendermaßen zusammengefasst werden:

$$P = P_{Reib} + P_{Hub} = I_V \cdot \rho \cdot g \cdot \left(\lambda \cdot \frac{D}{S} \cdot L + H \right) \quad (11)$$

In Gleichung (11) ist somit ebenfalls nur der Leistungsbeiwert λ unbekannt. Nach dessen Bestimmung kann die Förderleistung eines geneigten Schneckenförderers einfach und praxistauglich berechnet werden. Die Bestimmung des Leistungsbeiwerts λ ist ebenso wie die des Geschwindigkeitsbeiwerts ζ im Folgenden beschrieben.

5 Datenerhebung

Zur Erhebung der für die Bestimmung der empirischen Beiwerte nötigen Daten werden verschiedene Methoden angewandt: Die Auswertung der oben beschriebenen analytischen Berechnungsverfahren, experimentelle Versuche mit einer Großversuchsanlage für Schneckenförderer sowie Simulationen nach der Diskreten Elemente Methode. Durch diesen Einsatz von verschiedenen Methoden zur Datengewinnung ist es möglich Datensätze für alle (Rand-)Bereiche des Anwendungsbereichs zu gewinnen.

5.1 Experimentelle Versuche

Die experimentellen Versuche werden mit der Großversuchsanlage am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik durchgeführt. Diese gleicht sowohl in ihren geometrischen Abmessungen als auch in ihren technischen Daten mehr einer industriellen Förderanlage als einer modellhaften Versuchsanlage. Sie wurde für einen Nennvolumenstromstrom von $I_V = 0,0275 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgelegt; die konstruktive Gestaltung der Förderorgane ermöglicht den Einsatz und die Analyse von feinkörnigen, grobkörnigen bis stückigen Schüttgütern wie z. B. Getreide, Kohle und Schwefel.

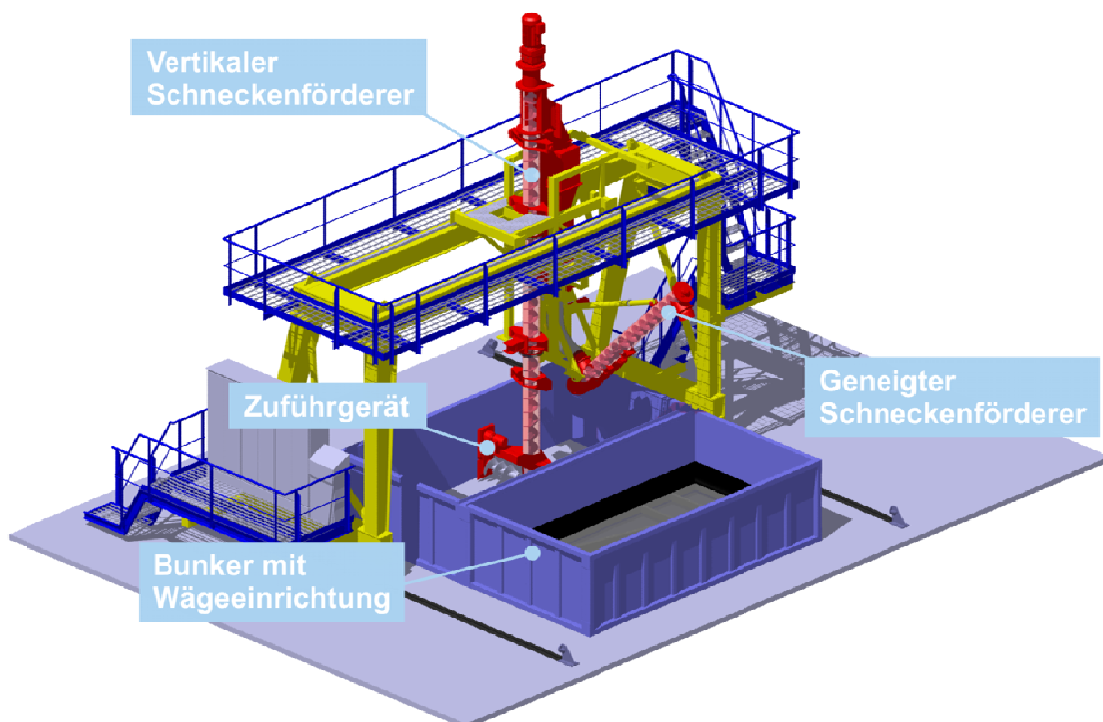


Bild 4: Versuchsanlage am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit erfordert eine Erweiterung des Betriebsbereichs auf stark geneigte Förderung (bis $\beta = 60^\circ$). Hierzu wurden an der bestehenden Großversuchsanlage Umbaumaßnahmen durchgeführt. Die Versuchsanlage wurde sowohl durch fördertechnische als auch messtechnische Komponenten ergänzt und hinsichtlich Ihrer Funktionalität wesentlich erweitert. Im aktuellen Zustand besteht die Versuchsanlage aus den drei Förderorganen Zuführförderer, vertikaler Schneckenförderer und geneigter Schneckenförderer. Die technischen Daten der Schneckenförderer sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Technische Daten der Schneckenförderer der Versuchsanlage

		Zuführ- förderer	Vertikaler Förderer	Geneigter Förderer
Förderlänge	[m]	2 x 0,75	7,0	3,0
Schneckendurchmesser	[m]	0,40	0,26	0,26
Schneckenganghöhe	[m]	0,40	0,23	0,23
Maximale Schneckendrehzahl	[1/s]	1,7	9,3	9,3
Installierte Antriebsleistung	[kW]	1,5	30,0	15,0

Während der Versuchsdurchführung ist das Schüttgut in einem 6 m x 3 m x 1,5 m großen Bunker gelagert. Von dort wird es bahnen- und schichtweise mit Hilfe der Zuführschnecke abgefräst und über den vertikalen und den geneigten Schneckenförderer in einen zweiten Bunker gefördert. Über die Einstellung der Frästiefe und der Vorschubgeschwindigkeit kann zusammen mit der Breite des Zuführförderers der geförderte Volumenstrom voreingestellt werden. Die Schneckendrehzahlen können unabhängig voneinander über die Frequenzumrichter stufenlos geregelt werden. Über die Frequenzumrichter erfolgt auch die Auswertung der Versuche. Während der Durchführung werden im jeweiligen Frequenzumrichter die charakteristischen Daten wie Wirkstromaufnahme und Drehzahlen der einzelnen Schneckenförderer kontinuierlich erfasst. Zusätzlich erlaubt die an der Versuchsanlage installierte Messtechnik die Erfassung von weiteren wichtigen Messdaten. Neben der Neigung des Schneckenförderers und dessen Füllungsgrad wird der geförderte Massenstrom durch Differenzwiegung des gesamten Bunkerinhalts aufgenommen. Diese Werte werden als analoge Signale ebenfalls im Frequenzumrichter erfasst. Die in den Frequenzumrichtern gespeicherten Daten werden mit Hilfe einer Auswertungssoftware ausgelesen und zur weiteren Verarbeitung in einer Ergebnisdatei zusammengefasst. Damit können die angesprochenen Einflussfaktoren Schneckendrehzahl, Füllungsgrad und Neigung direkt eingestellt oder zumindest kontinuierlich überwacht werden. Neben diesen Parametern haben auch die Eigenschaften des Schüttguts Einfluss auf den Fördervorgang und den Leistungsbedarf. Die Versuche werden daher für verschiedene Schüttgüter wiederholt. Die zu untersuchenden Parameter sind mit den jeweiligen Parameterstufen in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Untersuchte Parameterstufen bei den Versuchen

		Parameterstufen				
Schneckendrehzahl n	[1/s]	2	3,5	5	6,5	8
Neigungswinkel β	[°]	20	30	40	50	60
Füllungsgrad φ	[-]	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

Aus den aufgezeichneten Daten können schließlich die zur Erstellung der Dimensionierungs- und Auslegungsvorschriften nötigen Zielgrößen berechnet werden. Aus dem gemessenen Massenstrom I_m kann der empirische Geschwindigkeitsbeiwert ζ^* nach

$$\zeta^* = \frac{4 \cdot I_m}{\rho \cdot \varphi \cdot (D^2 - d^2) \cdot \pi \cdot S \cdot n} \quad (12)$$

mit der Schüttdichte ρ , dem Füllungsgrad φ , dem Schneckendurchmesser D , dem Wellendurchmesser d , der Schneckenganghöhe S sowie der Schneckendrehzahl n berechnet werden. Ebenso kann aus dem aufgezeichneten aufgenommenen Wirkstrom I_{Wirk} des geneigten Schneckenförderers der empirisch ermittelte Leistungsbeiwert λ

$$\lambda^* = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{eff} \cdot I_{Wirk} \cdot \eta - P_{Leer}}{I_m \cdot g \cdot \frac{D}{S} \cdot L} - \frac{S \cdot H}{D \cdot L} \quad (13)$$

unter Berücksichtigung der effektiven Spannung U_{eff} , des Motor- und Getriebewirkungsgrad η , der Leerlaufleistung P_{Leer} , dem erzielten Massenstrom I_m , der Förderlänge L , der Schneckenganghöhe S , dem Schneckendurchmesser D und Förderhöhe H berechnet werden.

5.2 Simulationen nach der Diskreten Elemente Methode

Des Weiteren werden Daten durch Simulationen nach der Diskreten Elemente Methode (DEM) gewonnen. Solche Simulationen sind im Prinzip numerische Experimente, bei denen neben der Geometrie des Förderers die einzelnen Schüttgutpartikel als diskrete Elemente abgebildet werden. In jedem Rechenschritt werden für alle Partikel die Newtonschen Bewegungsgleichungen gelöst und sie gestattet somit die Berechnung und Simulation von diskreten, diskontinuierlichen Vorgängen. Diese Simulationsmethode ist prinzipiell sehr einfach, geriet aber früher durch die sehr große Anzahl an zu berücksichtigenden Partikeln an ihre Grenzen. Erst durch den Einsatz moderner Computer mit Mehrkern-technologie und hoher Rechengeschwindigkeit ist es möglich auch komplexe Simulationen mit mehreren zehntausend Partikeln und hoher Auflösung in der Genauigkeit in akzeptablen Zeiten zu berechnen [10]. Im Rahmen dieser Untersuchung kommt das Simulationsprogramm EDEM der Firma DEM Solutions Ltd. zum Einsatz.

Die Simulationen werden mit einem PET-Granulat als Schüttgut durchgeführt. Dieses Granulat wird auch am realen Versuchsstand des Lehrstuhls verwendet und ist somit in den Eigenschaften und im Verhalten bekannt. Da die Simulationen aufgrund der zu erwartenden Rechenzeit nur mit vergrößerten Partikeln durchgeführt werden können, muss das simulierte Schüttgut kalibriert werden. Dazu werden Versuche zur Bestimmung von Schüttguteigenschaften real durchgeführt und in der Simulation nachgebildet. Als Versuche werden die Bestimmung der Schüttdichte, des Böschungswinkels und der Wandreibung gewählt. Der Versuchsaufbau als auch die Simulationsmodelle für die Kalibrierung orientieren sich an den Empfehlungen der *FEM 2481* [11]. Zur Kalibrierung werden die Simulationsparameter dabei iterativ so lange verändert bis das Verhalten der Partikel im Simulationsmodell dem realen Schüttgutverhalten mit ausreichender Genauigkeit entspricht.

Neben dem simulierten Schüttgut ist natürlich der Förderer an sich von elementarer Bedeutung. Die Maße der Förderer werden zunächst analog zum existierenden Versuchsstand gewählt. Dadurch kann das Simulationsmodell mit Daten der Versuchsanlage verifiziert werden. Sämtliche Geometriemodelle können über die CAD-Daten-Schnittstelle direkt in das Simulationsmodell geladen werden. Das simulierte Modell ist in Bild 5 dargestellt.

EDEM Academic



EDEM Academic

Bild 5: Simulationsmodell des Schneckenförderers

Schließlich sind noch die simulierten Betriebsparameter des Schneckenförderers festzulegen. Variiert werden die Schneckendrehzahl n , die Schneckenneigung β , der Füllungsgrad φ sowie der Schneckendurchmesser D . Die zu simulierenden Parameterstufen sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die Simulationsplanung erfolgt teilfaktoriell.

Tabelle 3: Simulierte Parameterstufen der DEM-Simulationen

		Parameterstufen				
Schneckendrehzahl n	[1/s]	1	3	5	7	9
Neigungswinkel β	[°]	30	45	60		
Füllungsgrad φ	[-]	0,2	0,4	0,6		
Schneckendurchmesser D	[m]	0,2	0,26	0,4		

Als Zielgrößen werden die durchschnittliche axiale Gutgeschwindigkeit v_{ax} und das an der Schneckenwelle gemessene Drehmoment M ausgewertet. Über die ausgelesenen Zielgrößen kann der simulierte Geschwindigkeitsbeiwert ζ^* durch den Zusammenhang

$$\zeta^* = \frac{v_{ax}}{S \cdot n} \quad (14)$$

aus der axiale Gutgeschwindigkeit v_{ax} , der Schneckenganghöhe S und der Schneckendrehzahl n berechnet werden. Der simulierte Leistungsbeiwert λ^* berechnet sich nach

$$\lambda^* = \frac{2\pi \cdot n \cdot M \cdot S}{I_V \cdot \rho \cdot g \cdot L} - \frac{S \cdot H}{D \cdot L} \quad (15)$$

aus der Schneckendrehzahl n , dem Drehmoment M , der Schneckenganghöhe S , dem erzielten Volumenstrom I_V , der Schüttdichte ρ , der Förderlänge L , der Förderhöhe H und dem Schneckendurchmesser D .

5.3 Auswertung analytischer Berechnungsverfahren

Wie bereits oben beschrieben liefern die Berechnungsverfahren von *Vollmann* [1] gute Ergebnisse für die Bestimmung des Volumenstroms für geneigte Schneckenförderer, auch wenn die Berechnung sehr aufwendig und nur numerisch möglich ist. Dennoch erscheint es sinnvoll bei Parameterstufen, für die Versuche nicht möglich oder Simulationen zu aufwendig sind, auf diese Berechnungsalgorithmen zurückzugreifen. Zusätzlich werden ebenfalls Parameterkombinationen berechnet, die auch in den Simulationen und Versuchen verwendet werden, um eine Validierung des Verfahrens durchzuführen. Es werden die in Tabelle 4 dargestellten Parameterstufen berechnet, wobei auf Grund des Aufwandes keine vollfaktorielle Parametervariation durchgeführt wird.

Tabelle 4: Berechnete Parameterstufen nach dem Verfahren von Vollmann [1]

		Parameterstufen						
Schneckendrehzahl n	[1/s]	2	4	5	6	8	10	13
Neigungswinkel β	[°]	30	40	50	60	70	80	90
Füllungsgrad φ	[-]	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	
Schneckendurchmesser D	[m]	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500	0,630	0,800

Das Berechnungsverfahren liefert als Ergebnis die Gutwinkelgeschwindigkeit ω_G des Schüttguts im Schneckenförderer. Daraus kann der ermittelte Geschwindigkeitsbeiwert ζ^* durch

$$\zeta^* = 1 - \frac{\omega_G}{2\pi \cdot n} \quad (16)$$

mit der Schneckendrehzahl n berechnet werden.

6 Erstellung des Dimensionierungs- und Auslegungsverfahrens

Die bisher gewonnenen Daten der Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwerte werden im Folgenden bezüglich der Einflüsse der untersuchten Parameter analysiert und somit für die Erstellung der Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren aufbereitet. Da die Darstellung der einzelnen Datenpunkte oft nicht ausreicht um verwertbare Rückschlüsse auf den Einfluss eines Parameters treffen zu können, wird eine lokal gewichtete Regression verwendet, um deskriptiv die Einflüsse bewerten zu können. Bei diesem werden die Zusammenhänge zwischen Parametern und Zielgröße völlig flexibel und unabhängig von Restriktionen geschätzt. Es liefert daher sehr genaue Ergebnisse, die aber mit einer hohen Komplexität des Modells erkauft werden müssen: Durch die vollkommen freie Gestaltung der Zusammenhänge ist es meist nicht mehr möglich den gefundenen Zusammenhang in kompakten Formeln, wie sie im Rahmen dieses Projekts gewünscht sind, darzustellen. Dennoch erlaubt die grafische Darstellung des modellierten Zusammenhangs einen Blick auf den eventuell zugrundeliegenden Effekt.

Im Anschluss daran bilden diese Effekte die Basis für die Modellbildung der Regressionsanalyse. Durch diese werden die Zielgrößen Geschwindigkeitsbeiwert ζ und Leistungsbeiwert λ in Abhängigkeit der untersuchten Einflussparameter in einem formelmäßigen Zusammenhang dargestellt. Neben einer adäquaten Anpassung des Modells an die vorhandenen Datensätze steht dabei die Einfachheit des Modells im Vordergrund, d.h. das berechnete Modell soll in einer einfachen und geschlossenen Form darstellbar sein. Abschließend wird die Güte der gefundenen Formeln beurteilt. Dazu werden die durch die neuen Formeln bestimmten Werte der Kenngrößen den ermittelten Werten gegenübergestellt und der mittlere Fehler berechnet. Dadurch kann beurteilt werden, ob die gefundenen Formeln das reale Verhalten mit ausreichender Genauigkeit abbilden.

6.1 Geschwindigkeitsbeiwert

Für den Geschwindigkeitsbeiwert ζ^* soll ein Regressionsmodell in Abhängigkeit der Parameter Schneckendrehzahl n , Schneckendurchmesser D , Füllungsgrad φ und Schneckenneigung β gefunden werden. Wie oben beschrieben wird dazu eine lokal gewichtete Regression für die ermittelten Geschwindigkeitsbeiwerte berechnet. In Bild 6 sind diese jeweils in Abhängigkeit der einzelnen Einflussparameter dargestellt. Die unterschiedlichen Einflüsse auf den Geschwindigkeitsbeiwert sind in den einzelnen Diagrammen zu erkennen.

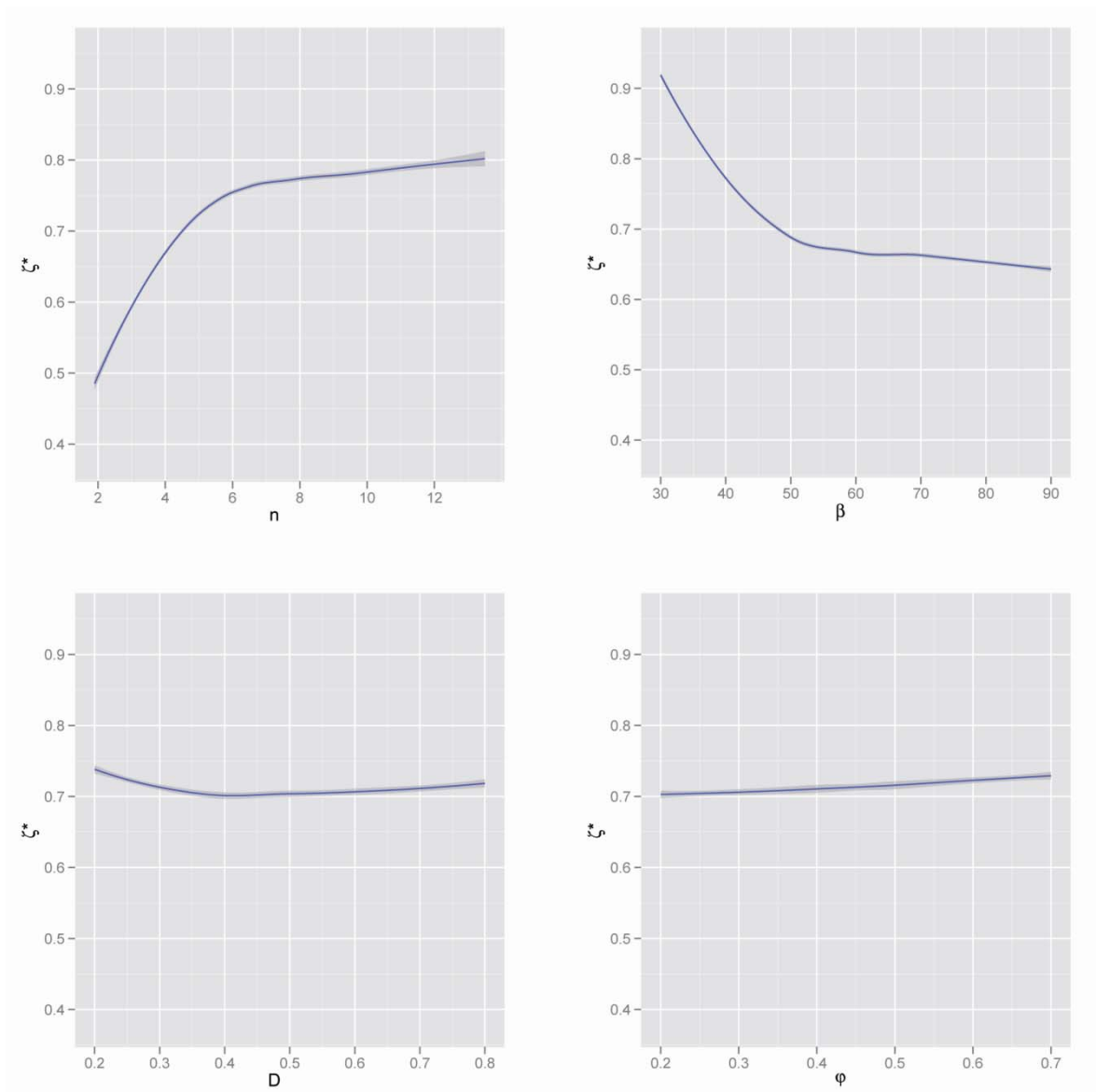


Bild 6: Einflüsse auf den Geschwindigkeitsbeiwert

Im Diagramm links oben ist der Geschwindigkeitsbeiwert ζ über der Schneckendrehzahl n aufgetragen. Zu erkennen ist ein zunächst starker positiver Zusammenhang, der sich ab Schneckendrehzahlen von ca. $n = 6$ 1/s deutlich abschwächt. Der Verlauf der Kurve ent-

spricht einer Logarithmus- oder Potenzfunktion. Der Einfluss der Schneckenneigung β ist oben rechts dargestellt. Hier lässt sich eine reziproke Proportionalität identifizieren. Alternativ könnte die Kurve auch als Kombination von zwei linearen Zusammenhängen mit einem Knickpunkt zwischen $\beta = 40^\circ$ und 50° Schneckenneigung gedeutet werden. Die Einflüsse von Füllungsgrad φ und Schneckendurchmesser D , abgebildet unten links und rechts, sind augenscheinlich am Schwächsten. Für den Füllungsgrad lässt sich ein leichter linearer Einfluss, für den Schneckendurchmesser ein leicht nichtlinearer Einfluss erkennen.

Damit sind die Arten der Einflussnahme der einzelnen Parameter auf den ermittelten Geschwindigkeitsbeiwert ζ^* zunächst ausreichend identifiziert. Diese Zusammenhänge bilden die Grundlage für das Regressionsmodell für den Geschwindigkeitsbeiwert. Erste Regressionsrechnungen zeigen, dass der Einfluss der Schneckendrehzahl n durch eine Potenzfunktion sehr gut angenähert werden kann. Für den Einfluss der Schneckenneigung β hat sich ein Modell aus zwei linearen Einflüssen mit einem Knickpunkt bei $\beta = 40^\circ$ als beste Alternative ergeben. Für den Einfluss des Schneckendurchmessers D kann mit ausreichender Genauigkeit ein linearer Zusammenhang angenommen werden, um das Modell zu vereinfachen. Das Regressionsmodell hat damit die folgende Form:

$$\zeta = a \cdot n^b + c \cdot D + d \cdot \varphi + e \cdot \beta + f \quad (17)$$

Für die Regressionskoeffizienten ergeben sich in Abhängigkeit des Schneckenneigungswinkels die in Tabelle 5 aufgeführten Werte. Angegeben ist ebenfalls die jeweilige berechnete Standardabweichung der Koeffizienten.

Tabelle 5: Regressionskoeffizienten für den Geschwindigkeitsbeiwert

	$\beta = 30^\circ$		$\beta = 40^\circ$		$\beta > 40^\circ$	
	Koeffizient	Standardabweichung	Koeffizient	Standardabweichung	Koeffizient	Standardabweichung
a	- 0,287003	0,001893	- 0,861013	0,005680	- 1,146694	0,003376
b	- 0,795297	0,018035	- 0,795313	0,018035	- 0,793336	0,008084
c	0,068029	0,000770	0,204090	0,002311	0,272243	0,001381
d	0,023858	0,000757	0,071570	0,002271	0,095512	0,001356
e	-	-	-	-	- 0,000987	0,000016
f	0,958562	0,001882	0,875682	0,005645	0,879204	0,003576

Eine im Verhältnis zum Koeffizienten kleine Standardabweichung ist ein Anzeichen für einen signifikanten Einfluss der zum Koeffizienten gehörenden Variablen. Es zeigt sich, dass die Standardabweichung für alle Koeffizienten bei maximal 3% des Koeffizientenwertes liegt und somit bei allen betrachteten Variablen von einem signifikanten Einfluss ausgegangen werden kann.

Um abschließend die Güte des Regressionsmodells beurteilen zu können, werden die durch das Regressionsmodell berechneten Werte für den Geschwindigkeitsbeiwert ζ mit den ermittelten Werten ζ^* verglichen und zunächst grafisch dargestellt. In Bild 7 sind dazu die geschätzten Werte ζ über den ermittelten Werten ζ^* aufgezeichnet. Je näher die Punkte auf der Winkelhalbierenden liegen, desto besser ist dabei das Modell.

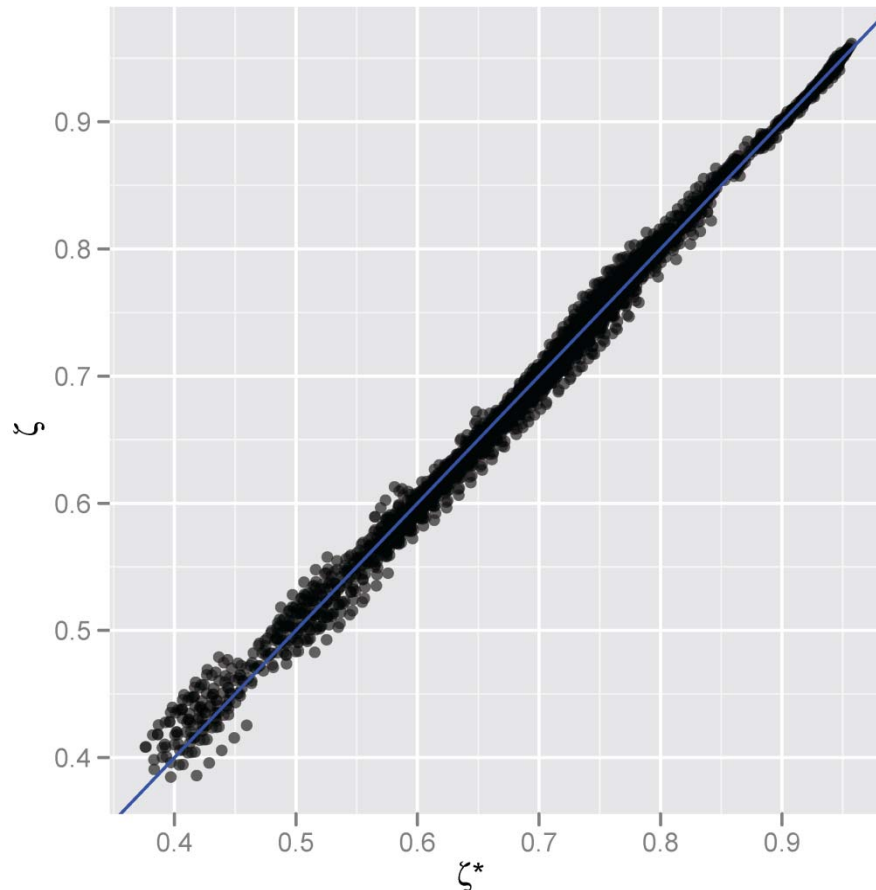


Bild 7: Modellanpassung für den Geschwindigkeitsbeiwert

Es ist zu erkennen, dass keine größeren Ausreißer vorhanden sind und sich die Datenpunkte der geschätzten Werte des Geschwindigkeitsbeiwerts ζ gut an die Winkelhalbierende anschmiegen. Zahlenmäßig kann die Güte des Modells zudem mit Hilfe der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers bewerten.

$$\sqrt{MQF} = \sqrt{\frac{1}{i} \sum_{k=1}^i (\zeta_k - \zeta_k^*)^2} \quad (18)$$

Für das vorliegende Modell beträgt die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers $\sqrt{MQF} = 0,0111$. Dies entspricht auch bei den kleinsten ermittelten Geschwindigkeitsbeiwerten ζ^* einer durchschnittlichen Abweichung von kleiner 3% und zeigt die ausreichende

Genauigkeit des berechneten Regressionsmodells. Um bewerten zu können, wo die Abweichungen des Modells liegen, sind in Bild 8 die ermittelten und geschätzten Werte des Geschwindigkeitsbeiwerts in den einzelnen Kategorien dargestellt. Um die Komplexität auf ein nötiges Maß zu beschränken ist hier der Parameter Schneckendurchmesser D nicht mehr aufgeschlüsselt, da dieser den geringsten Einfluss hat und die Diagramme sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Zu erkennen ist, dass in nahezu allen Feldern eine gute Übereinstimmung der ermittelten Datenpunkte mit dem berechneten Modell (Kurve) vorhanden ist. Einzig in einzelnen Randbereichen gibt es kleinere Abweichungen.

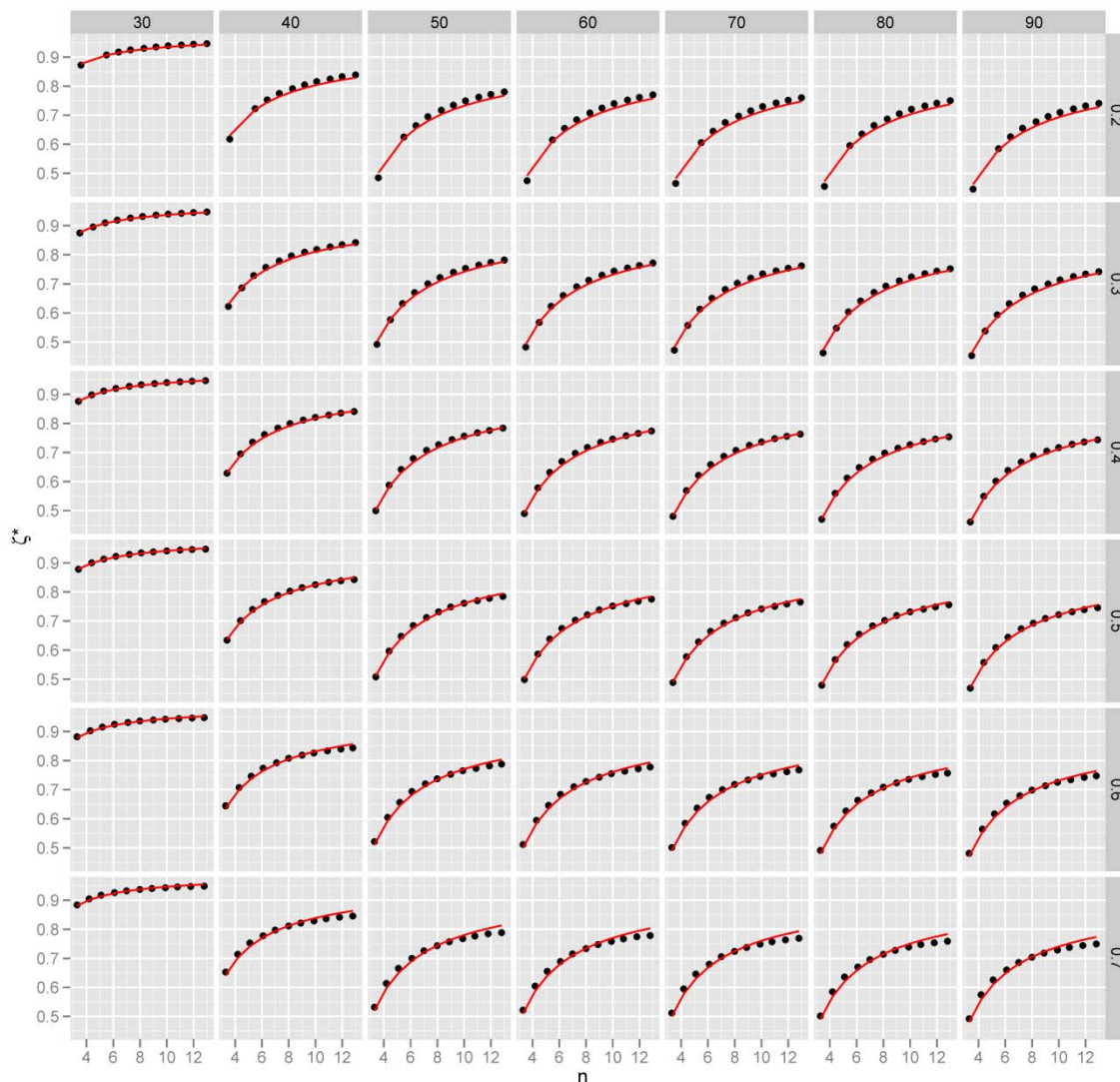


Bild 8: Modellanpassung für den Geschwindigkeitsbeiwert

Das gefundene Regressionsmodell ist also zur Berechnung des Geschwindigkeitsbeiwerts geeignet. Der erzielbare Volumenstrom I_V eines geeigneten Schneckenförderers kann damit durch die Gleichungen (6) und (17) einfach und zuverlässig berechnet werden.

6.2 Leistungsbeiwert

Nach dem Geschwindigkeitsbeiwert ζ wird nun im Folgenden die Entwicklung des Leistungsbeiwerts λ beschrieben. Analog zum obigen Vorgehen wird auch hier ein Regressionsmodell in Abhängigkeit der Einflussgrößen entwickelt. Neben den bereits beim Geschwindigkeitsbeiwert verwendeten Parametern Schneckendrehzahl n , Füllungsgrad φ und Schneckenneigung β müssen bei der Bestimmung des Leistungsbeiwerts noch die Eigenschaften des Schüttguts berücksichtigt werden, da diese entscheidenden Einfluss auf das Reibverhalten haben. Zunächst werden dazu die Schüttdichte ρ sowie die Reibwerte gegen Schneckenwendel und Rohr μ_s und die innere Reibung μ_i als Einflussgrößen des Schüttguts betrachtet. Es wird dabei davon ausgegangen, dass der Reibwert gegen Schneckenwendel und Rohr gleich ist. Als Werkstoff von Schneckenwendel und Rohr wird Stahl verwendet. Der Parameter Schneckendurchmesser D wird hier nicht betrachtet, da er den bisherigen Ergebnissen nach keinen signifikanten Einfluss auf den Leistungsbeiwert λ hat. Anzumerken ist hier, dass der Schneckendurchmesser D gemäß den in Abschnitt 4.2 dargestellten Zusammenhängen sehr wohl Einfluss auf die nötige Antriebsleistung hat. Dies wurde auch bereits von *Rong* [6] und *Blomeyer* [4] so festgestellt. Um zunächst wieder den generellen Einfluss der Parameter beurteilen zu können, werden in Bild 9 die Ergebnisse einer lokalen gewichteten Regression grafisch dargestellt.

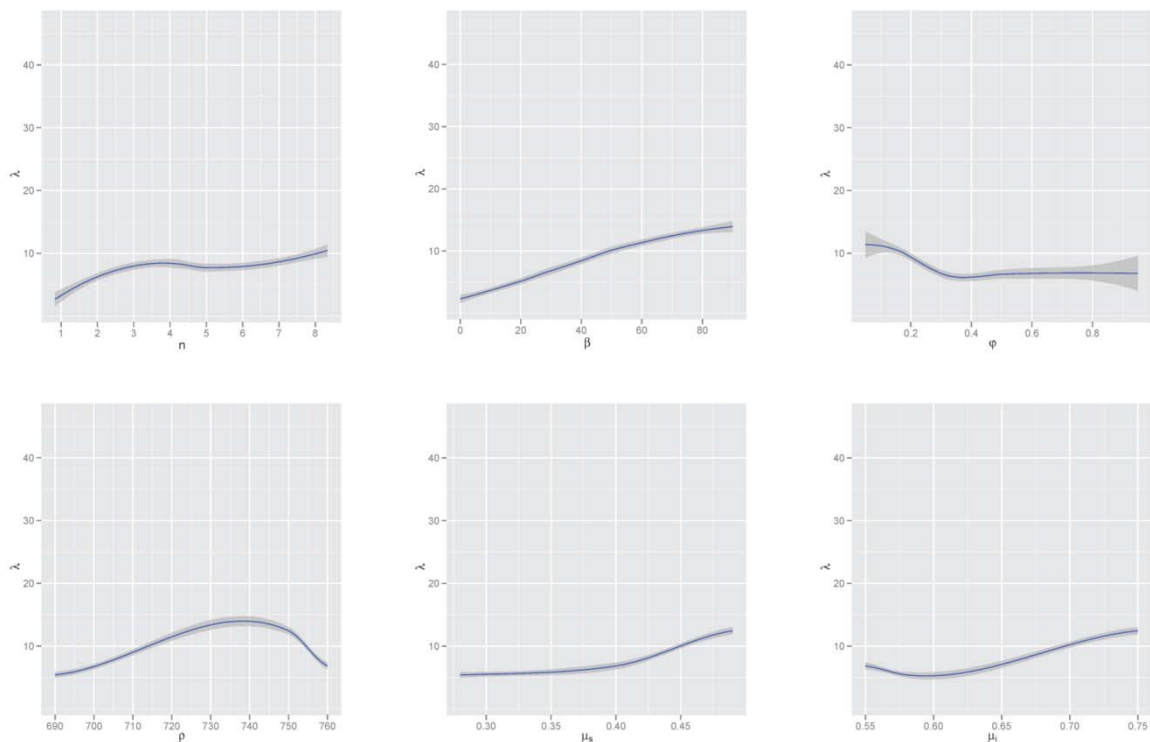


Bild 9: Einflüsse auf den Leistungsbeiwert

Wie schon beim Geschwindigkeitsbeiwert hat auch hier die Schneckendrehzahl n , im Diagramm oben links, großen Einfluss. Zu erkennen ist eine Potenzfunktion, die insgesamt einen positiven Zusammenhang darstellt. Im Bereich zwischen ca. $n = 3,5$ 1/s und $5,5$ 1/s

ist der Einfluss schwach. Für den Neigungswinkel β zeigt sich ein anfangs linearer positiver Zusammenhang, der sich zunehmend abschwächt. Der Einfluss des oben rechts abgebildeten Füllungsgrades φ ist zunächst negativ einzustufen. Ab Werten von ca. $\varphi = 0,4$ verschwindet der Einfluss. Bei den Schüttgutparametern, dargestellt in der unteren Zeile von Bild 9, lassen sich folgende Zusammenhänge identifizieren, wobei anzumerken ist, dass nur immer bestimmte Kombinationen der 3 Parameter möglich sind, die dann ein Schüttgut beschreiben. Daher ist eigentlich immer der Einfluss aller drei Parameter auf den Leistungsbeiwert λ gemeinsam zu bewerten. Dennoch werden im Folgenden die einzelnen Parameter betrachtet, da der Einfluss des Schüttguts vereinfacht durch diese Parameter beschrieben werden soll. Für die Schüttdichte ρ steigt der Einfluss zunächst an, um nach einem Maximum bei ca. $\rho = 740 \text{ kg/m}^3$ wieder zu sinken. Der Reibwert gegen Schneckenwendel und Rohr hat insgesamt einen positiven Einfluss, der zunächst sehr schwach ist und ab einem Wert von ca. $\mu_s = 0,35$ stärker wird. Ähnlich ist der Zusammenhang beim inneren Reibwert μ_i . Der zunächst sehr schwach negative Einfluss wird ab einem Reibwert von ca. $\mu_i = 0,60$ deutlich positiv.

Nachdem nun auch für den Leistungsbeiwert λ die Einflüsse analysiert sind, besteht der letzte noch durchzuführende Arbeitsschritt noch in der Findung eines möglichst einfachen formelmäßigen Zusammenhangs, um den Leistungsbeiwert aus den beschriebenen Parametern einfach und sicher berechnen zu können.

7 Zusammenfassung

Im durchgeführten Projekt zur Ermittlung von Dimensionierungs- und Auslegungsvorschriften für stark geneigte Schneckenförderer wird die Förderung von Schüttgut in Schneckenförderern, die mit hohen Drehzahlen und Füllungsgraden betrieben werden, im Neigungsbereich zwischen 20° und 60° untersucht. Ziel ist die Entwicklung von einfachen, praxistauglichen und sicheren Verfahren zur Berechnung des erzielbaren Volumenstroms und der dazu notwendigen Antriebsleistung.

Während für die Vorherbestimmung des Bewegungsverhaltens und damit des möglichen Volumenstroms analytische Rechenverfahren möglich und verfügbar sind, entzieht sich die Berechnung der Antriebsleistung einer analytischen Betrachtung. Effekte wie Guteinklemmung oder -zerstörung im Spalt zwischen Schneckenwendel und Rohr, die den Energiebedarf zur Förderung deutlich erhöhen, sind zu vielfältig, als dass sie durch analytische Betrachtungen erfasst werden könnten. Wie für andere Betriebsbereiche von Schneckenförderern (horizontal bis leicht geneigt und vertikal) auch, wird bei der Bestimmung der Berechnungsvorschriften deshalb ein semi-empirisches Verfahren zur Abbildung der schwer erfassbaren Vorgänge innerhalb des Auslegungsverfahrens eingesetzt.

Grundlage für ein semi-empirisches Verfahren ist ein analytischer Grundansatz, der um eine oder mehrere empirisch ermittelte Kenngrößen erweitert wird. Die empirischen Kenngrößen bilden darin die analytisch nicht erfassbaren Einflüsse in Abhängigkeit der bekannten Parameter ab. Als Grundansatz für die beiden im Rahmen dieses Projekts betrachteten Zielgrößen, Volumenstrom und Antriebsleistung, werden die aus der *DIN 15262* [5] bekannten Formeln verwendet und entsprechend den theoretischen Unter-

suchungen, die in früheren Projekten erarbeitet wurden, angepasst.

Um die empirischen Kenngrößen zuverlässig für den gesamten Anwendungsbereich bestimmen zu können, ist eine ausreichende Menge an Datensätzen für die Kenngrößen nötig. Diese notwendigen Datensätze werden mit drei verschiedenen Möglichkeiten erzeugt: Experimentelle Untersuchungen an einer Großversuchsanlage, Simulationen nach der Diskreten Elemente Methode und Berechnung mit numerischen Verfahren, die in Vorgängerprojekten erarbeitet wurden. Durch diese Aufspaltung der Datengewinnung auf verschiedene Methoden ist es möglich alle Bereiche des Anwendungsbereichs mit Datensätzen zu belegen.

Die gewonnenen Datensätze werden anschließend mit statistischen Methoden eingehend untersucht. In einem ersten Schritt werden dazu die Einflüsse der einzelnen Parameter deskriptiv auf die Art des Einflusses hin ausgewertet. Aufbauend darauf können dann in einem zweiten Schritt diese Erkenntnisse in die Modelle für die empirischen Kenngrößen, die durch Regressionsrechnungen bestimmt werden, einfließen. Ergebnis sind einfache Formeln, die die Zusammenhänge der Einflussparameter auf die Kenngrößen beschreiben und damit eine zuverlässige Vorhersage ermöglichen. Zusammen mit dem analytischen Grundansatz kann damit der mögliche Volumenstrom und die dazu nötige Antriebsleistung berechnet werden.

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Name
A	[m ²]	Querschnittsfläche
D	[m]	Schneckendurchmesser
F_N	[N]	Normalkraft
H	[m]	Förderhöhe
I_M	[kg/s]	Massenstrom
I_V	[m ³ /s]	Volumenstrom
I_{Wirk}	[A]	Aufgenommener Wirkstrom
L	[m]	Förderlänge
P	[W]	(Förder-)Leistung
MQF	[-]	Mittlerer quadratischer Fehler
P_{Hub}	[W]	Hubleistung
P_{Leer}	[W]	Leerlaufleistung
P_{Reib}	[W]	(Fiktive) Gesamtreibleistung
S	[m]	Schneckenanghöhe
U_{eff}	[U]	Effektive Spannung
a	[m/s ²]	Beschleunigung
d	[m]	Wellendurchmesser
g	[m/s ²]	Fallbeschleunigung
i	[-]	Anzahl der Datensätze
n	[1/s]	Schneckendrehzahl
k	[-]	Laufvariable
v_{ax}	[m/s]	Gutaxialgeschwindigkeit
v_G	[m/s]	Absolute Gutgeschwindigkeit
β	[°]	Schneckenneigung
ζ	[-]	Geschwindigkeitsbeiwert
ζ^*	[-]	Empirischer / Simulierter / Ermittelter Geschwindigkeitsbeiwert
η	[-]	Motor- und Getriebewirkungsgrad
λ	[-]	Verschiebewiderstandsbeiwert / Leistungsbeiwert
λ^*	[-]	Empirischer / Simulierter / Ermittelter Leistungsbeiwert
λ_h	[-]	Verschiebewiderstandsbeiwert für horizontale, leicht geneigte SF
μ_S	[-]	Reibwert gegen Schneckenwendel und Rohr
μ_i	[-]	Innerer Reibwert des Schüttguts
ρ	[kg/m ³]	Schüttdichte
φ	[-]	Füllungsgrad
ω_G	[1/s]	Gutwinkelgeschwindigkeit

Literaturverzeichnis

- [1] Vollmann, A.: Untersuchung der Schüttgutförderung in geneigten Schneckenförderern; Dissertation, München, Technische Universität München, 2000
- [2] Günthner, W. A.; Fottner, J.; Rong, O.: Empirische Entwicklung von Kenngrößen zur Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern für Schüttgut; Herbert Utz Verlag, München, 2002
- [3] Günthner, W. A.; Blomeyer, N.; Rong, O.: Entwicklung von praxistauglichen Auslegungsverfahren für Schüttgut-Hochleistungs-Schneckenförderer, Forschungsbericht, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching bei München, 2006
- [4] Blomeyer, N.: Erweiterung und Verifikation von Auslegungsverfahren für Hochleistungs-Schneckenförderer für Schüttgut; Dissertation, München, Technische Universität München, 2008
- [5] DIN 15262:1983-01: Stetigförderer - Schneckenförderer für Schüttgut - Berechnungsgrundsätze, Deutsches Institut für Normung e.V.
- [6] Rong, O.: Auslegungsverfahren für Hochleistungs-Schneckenförderer; Dissertation, München, Technische Universität München, 2004
- [7] Gabler, H.: Theoretische und experimentelle Untersuchung der Förderung in steilen und senkrechten Schneckenförderern; Dissertation, München, Technische Universität München, 1981
- [8] Greinwald, K.: Untersuchung der Förderung leicht fließender Schüttgüter im senkrechten Schneckenförderer unter Berücksichtigung der Zwischenlager; Dissertation, München, Technische Universität München, 1994
- [9] Fottner, J.: Auslegung und wirtschaftlicher Einsatz von Hochleistungs-Schneckenförderern; Dissertation, München, Technische Universität München, 2002
- [10] Katterfeld, A.; Krause, F.: Funktionsanalyse eines Rohrkettenförderers mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode (DEM); In: Tagungsband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2004, Technische Universität München, Garching bei München, 2004
- [11] FEM 2181:1989: Spezifische Schüttguteigenschaften bei der mechanischen Förderung, Fédération Européenne de la Manutention